論 文 16-5-9

바이모달 트램용 직렬형 하이브리드 추진시스템 개발

裵昶漢†, 李剛遠*, 睦載均**, 柳斗永***, 裵宗珉****

Development of a Series Hybrid Propulsion System for Bimodal Tram

Chang-Han Bae, Kang-Won Lee, Jai-Kyun Mok, Doo-Young You, and Jong-Min Bae

요 약

바이모달 저상굴절 트램은 자동운전으로 일반도로와 전용구간을 주행할 수 있는 고무차륜방식의 저상굴절 차량으로서, 철도의 정시성과 버스의 접근성을 동시에 구현할 수 있는 신교통수단이다. 바이모달 트램은 전자기 궤도를 사용한 자동운전, 전차륜 조향과 함께 CNG 엔진과 리튬 폴리머 배터리 팩을 사용한 친환경 직렬형 하이브리드 추진시스템을 사용한다. 본 논문에서는 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진시스템 개발에 대해 기술하고 시험선 및 일반도로에서 수행된 시험 결과를 분석한다. 또한 바이모달 트램 추진장치의 튜닝 및 시험데이터 취득을 위해 개발된 계측장비의 구성 및 동작방식에 대해 설명한다. 시작차량에 설치된 계측장비의 데이터를 기초로 전용 시험선과 일반도로에서 주행시 직렬형 하이브리드 추진시스템의 동작을 확인하며, 차량의 연비 및 엔진 효율을 계산한다.

ABSTRACT

Bimodal tram is designed to run on a dedicated path in automatic mode using a magnetic track system in order to realize a combination of the accessibility of a bus and the constant regularity of a railroad. This paper presents design and test results of the series hybrid propulsion system of the bimodal tram on both test track and public road, which uses CNG (Compressed Natural Gas) engine and Lithium polymer battery pack. This paper describes the real-time data measuring equipment for the series hybrid propulsion system of the bimodal tram. Using this measurement equipment, the performance of the prototype vehicle's driving on test track and public road was verified and the fuel consumption and the efficiency of CNG engine have been investigated.

Key Words : Bimodal tram, series hybrid propulsion, CNG engine, battery

1. 서 론

대중교통시스템은 교통약자를 비롯한 이용자의 편의를 고려해 운영의 유연성과 접근성, 시스템 구축비용에 최소화, 원하는 시간에 승객이 이용할 수 있는 정시성이 요구된다. 현재 선진 외국에서는 고도화된 BRT(Bus Rapid Transit)를 이용한 대중교통시스템을 상업화하여 철도의 정시성의 운행체계와 버스의 접근성을 확보하고 있다. 더불어, 차제를 저상화하여 이용의 편의성과 짧은 탑승시간을 확보하고, 친환경 추진시스템을 도입하여 도심지의 쾌적한 운행환경 조성에

본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨
†교신저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : chbae@krri.re.kr
*정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
**정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원
***정회원, 현대중공업 기계전기연구소 책임연구원.
****정회원, 한국화이바 차량사업부 과장.
접수일자 : 2010. 7. 28 1차 심사 : 2010. 8. 20
2차 심사 : 2011. 9. 14 심사완료 : 2011. 9. 19

그림 1 시험선 바이모달 트램 시작차 사진
Fig. 1 Prototype of bimodal tram on test track

노력하고 있다.

바이모달 트램은 도로 모드와 철도모드를 효율적으로 조합한 신교통 시스템으로, 버스의 접근성과 철도의 정시성을 동시에 구현하는 것을 목표로 개발 중이다. 바이모달 트램은 기존의 일반도로와 전용도로를 주행할 수 있는 고무타이어 방식으로, 저상차체, 전자기 궤도를 사용한 자동운전장치, 전차륜조향 기능을 갖는다. 또한, 도심지 운행 환경을 고려해 배출가스 저감을 위한 직렬형 하이브리드 추진시스템을 사용한다[1]. 직렬형 하이브리드 추진시스템의 전력원으로 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG) 엔진과 리튬폴리머 배터리를 사용하며, 엔진은 일정한 속도로 최적 효율영역 내에서 회전하고, 배터리 팩을 충전시킨다. 이러한 직렬형 하이브리드 추진장치는 전기 모터로만 구동되는 전기추진장치로서, 짧은 구간에 대해 빈번한 정차가 필요한 도심지 주행에 적합하고, 배출가스가 적은 장점을 갖는다[2~5]. 그림 1은 현재 시험선에서 시험 운행중인 바이모달 트램 시작차 사진을 보여준다.

본 논문에서는 바이모달 트램에 적용된 직렬형 하이브리드 추진시스템의 구성에 대해 설명하고, 시험선과 일반도로 주행 시험 분석결과를 제시한다. 주행시험시 엔진-발전기셋과 배터리팩간의 전력분배 및 배터리 SOC(State Of Charge) 밸런싱 성능을 확인하고, 연료소비율과 엔진의 효율 분석한다. 또한, 하이브리드 추진장치의 정교한 튜닝과 성능측정을 목적으로 개발된 직렬형 하이브리드 추진시스템 계측장비에 대해 설명한다. 이 장치는 성능시험과정에서 추진시스템 각 구성품들의 성능 계측과 데이터 저장을 목적으로 개발했다. 더불어, 커미셔닝 시에는 각 구성품들에 대한 실시간 감시가 가능하기 때문에 추진장치 튜닝과정에서 발생할 수 있는 예기치 않은 고장위험에도 대처할 수 있는 장점이 있다[6]. 이 계측시스템을 사용해 취득한 전용시험선과 일반도로의 주행성능 측정결과를 제시하고 직렬형 하이브리드 추진시스템의 성능을 입증하고자 한다.

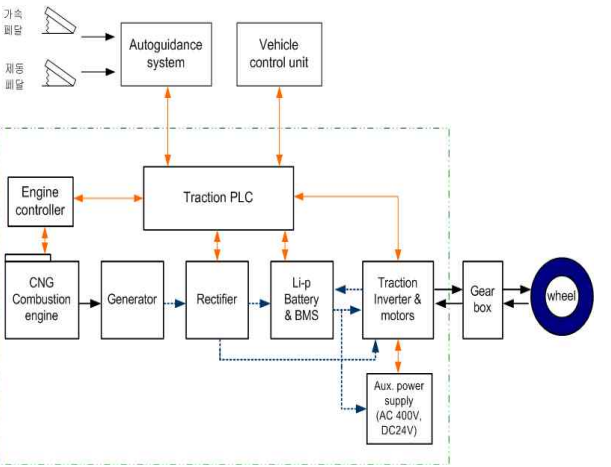


그림 2 바이모달 트램의 추진장치 블록도
Fig. 2 Schematic of series hybrid propulsion system

2. 직렬형 하이브리드 추진시스템

그림 2는 바이모달 트램용 직렬형 하이브리드 추진시스템 블록도를 나타낸다. 압축천연가스 엔진-발전기셋, 정류기, MDC(Modular Drive Controller), Li-polymer 배터리팩 및 BMS (Battery Management System), 감속기, 견인전동기, 추진제어 및 에너지관리를 수행하는 Traction PLC (Programmable Logic Controller), 차량의 기타 전장품의 구동과 제어전원을 위한 보조전원장치인 DC/AC 컨버터, DC/DC 컨버터로 구성된다.

Traction PLC는 가속 및 제동페달로부터 견인과 제동력 토크지령을 전달받아 추진인버터들에게 지령하고 ,요구출력에 맞는 엔진-발전기 셋과 배터리간의 전력분배 기능을 수행한다. 배터리 SOC 값에 따른 엔진-발전기 셋의 동작을 제어하고 배터리의 SOC 밸런싱을 확보한다. 또한, 추진장치 구성품들의 상태정보를 자동운전장치와 차량제어장치로 전송하는 역할도 수행한다. Traction PLC의 프로그램은 PLC의 표준언어인 FBD(Function Block Diagram)와 SFC(State Flow Chart)로 작성함으로써 프로그램이 명확하고 디버깅 및 수정이 용이하다. CNG 엔진은 Euro V 배출가스 기준을 만족하는 Cummins사의 230HP B Gas Plus CNG 엔진을 사용했다. 발전기는 별도의 여자전원 공급이 필요하지 않는 영구자석형 동기발전기를 사용했

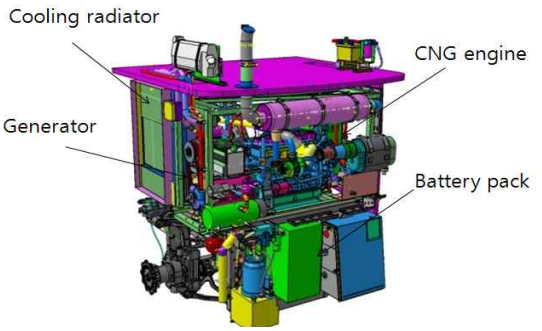


그림 3 바이모달 트램 시작차의 3축 엔진룸 3D 도면
Fig. 3 3D drawings for engine room and axle 3 of prototype vehicle

다. 배터리팩은 BMS(Battery Management System)와 80Ah의 리튬폴리머 전지 8셀을 묶어 1개의 모듈로 구성되고 총 22개의 모듈로 구성했다. 리튬폴리머 배터리의 과전압 보호를 위해 제동초퍼 및 저항기가 차량 지붕에 설치되었다. 이 장치는 회생제동 시 과도한 회생전력으로 인해 직류링크단 전압이 허용치 이상 상승한 경우 동작하여 회생에너지를 저항기의 열로 소모시키고 직류링크단 전압을 동작범위내로 유지시킨다. 보조전원장치는 24V 직류제어전원을 위한 DC/DC 컨버터와 각종 냉각팬과 펌프구동을 위한 380V 교류전원을 위해 SIV (Static Inverter) 1셋을 설치했다. 견인전동기는 제작 비용과 유지보수를 고려해 전폐형 수냉각 방식의 유도전동기를 사용했으며, 전차륜 조향을 위해 감속기와 일체형으로 제작했고, 4개의 견인전동기-감속기 셋이 휠에 장착되었다. 그림 3은 바이모달 트램 3축의 3D 도면으로, 엔진, 발전기, 배터리팩, 수냉식 라디에이터들의 장착위치를 보여준다.

바이모달 트램 추진장치는 IEC 61375 규격에 따른 철도차량용 MVB (Multifunction Vehicle Bus) 통신방식이 채용되었다. 현재까지 26m 길이의 차량이 해외에서 상용화된 점을 고려해 ESD, EMD, OGF의 3가지 방식 중, 1.5Mbps의 전송속도와 200m까지 통신거리를 갖는 ESD+ (Electrical Short Distance)방식을 선택했다[7]. 바이모달 트램과 직렬형 하이브리드 추진장치 구성품 사양은 표 1,2와 같으며, 자세한 사양 선정과 동작 모의 결과는 참고문헌[8]에 기술되었다.

바이모달 트램은 그림 4와 같이 3가지 운전모드로 주행이 가능하다. 배터리와 엔진-발전기 셋의 전력을 함께 사용하는 하이브리드 모드, 배터리 전력만을 사용하는 배터리 단독모드, 엔진-발전기 셋의 전력만을 사용하는 엔진 단독 모드로 설계되었다. 하이브리드

표 1 바이모달 트램 사양
Table 1 Vehicle parameters

항 목	내 용
편성단위	2량(18m), 3량(24m)
구조	2500(W)×3380(H)×1800(L)
승차정원	106명
중량	17,600kg(공차), 24,950kg(만차)
최고속도	80km/h
표정속도	30km/h 이상
구배기동	13%(공차)
추진방식	직렬형 하이브리드 추진시스템
최대가감속도	$\pm 1.2 m/s^2$
제동	회생/공기제동 병행
운전모드	하이브리드, 배터리, 엔진 모드
조향시스템	전차륜조향
최소회전반경	12m

표 2 추진장치 구성품 주요사양
Table 2 General technical description of the propulsion system

구 성 품	내 용
엔진	type : CNG, 5.9L, 230HP, EURO-V max. power : 172kW@2800rpm, max. torque : 678Nm@1600rpm
발전기	type : 3-ph synchronous, permanent magnetic, nominal power rating : 145kW cooling : water
배터리	type : Li-polymer, 80Ah nominal voltage : 650V cooling : air
추진인버터	type : IGBT, VVVF nominal power rating : 62kW X 4 cooling : air/water
보조전원장치	type : IGBT, 24Vdc, 380Vac noiminal power rating : 6kW, 20kW cooling : air/water
견인전동기	type : induction motor nominal power rating : 45kW X 4 efficiency : 90% cooling : water
감속기	type : helical gear ratio : 14.42:1

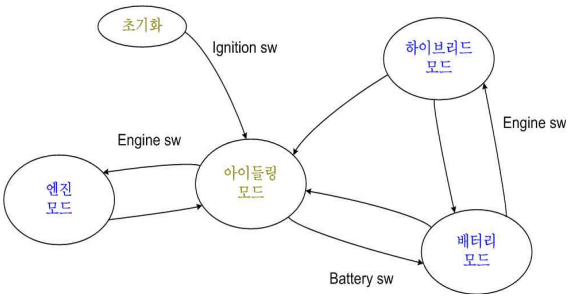


그림 4 운전모드 변환
Fig. 4 Schematic of driving mode transition

모드에서는 추진인버터와 견인전동기가 CNG 엔진-발전기 셋과 배터리 전력을 함께 활용해 최고연비와 배출가스 최소화하도록 했다. 만약 CNG 엔진-발전기 셋이 정상동작을 하지 못하는 경우나 터널 및 소음제한 구역을 운행 시에는 엔진을 정지시키고 배터리 단독 운행모드로 주행할 수 있다. 주행 노선의 운행조건에 따라 배터리 모드로 주행할 수 있는 최대 거리는 변경될 수 있지만, 최소 3km 이상의 제한적인 거리를 배출가스 없이 저소음으로 운행할 수 있도록 제작했다. 엔진단독 운행모드는 배터리팩을 정상 동작시킬 수 없는 경우, 엔진-발전기 셋의 출력만을 사용하여 차량을 제한적으로 운행할 수 있도록 했다.

3. 추진장치 계측장비

계측시스템은 통신계측과 IO 계측으로 구성했으며, 바이모달 트램 실내에 계측컴퓨터를 설치하고 Labview 프로그램을 사용해 모니터링 프로그램을 작성했다. 일반적인 계측장비의 경우, 사용 가능한 채널수가 제한되고, 많은 정보를 실시간으로 저장하기 어려우며, 시험주행 중의 안전성 확보에 어려움이 있다. 따라서, 추진장치 구성품들간의 MVB 통신상의 주요 상태 및 실시간 계측정보를 활용했다. 이를 위해 MVB 통신계측을 구성했으며, 추진시스템 MVB 통신 라인상에 MVB2CAN 변환기를 설치하고 통신계측용 프로토콜을 작성했다. 그림 5는 통신계측 장비의 구성을 나타내며, MVB2CAN 변환기, CAN2USB 변환기, Labview 프로그램 및 데스크탑 컴퓨터로 구성된다. 여기서, MVB2CAN 변환기는 추진장치의 MVB 통신상의 각종 계측 및 제어 신호데이터들을 CAN 신호로 변환시켜준다. 이 정보들은 CAN2USB 변환기를 거쳐 바이모달 트램 실내에 설치된 계측 컴퓨터 또는 노트북에 저장된다. IO 계측은 열전대 온도센서의 온도 정

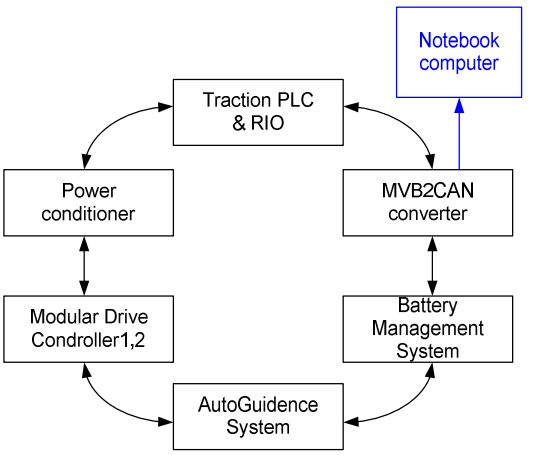


그림 5 MVB 통신 계측장비의 구성도
Fig. 5 Block diagram of MVB communication measurement equipment

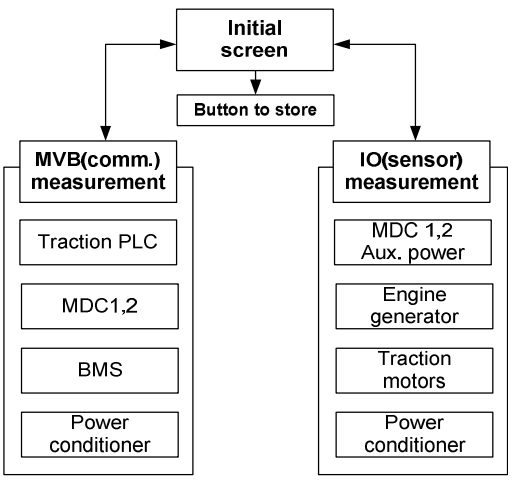
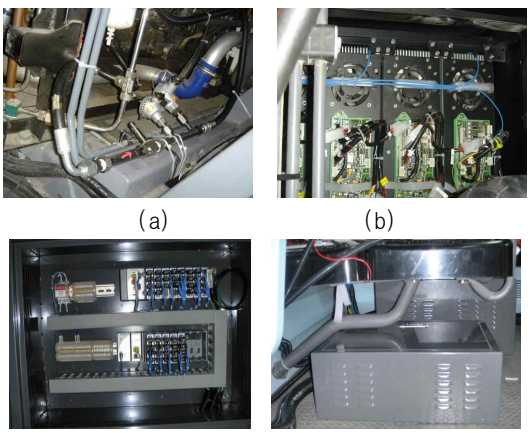


그림 6 계측시스템 구성도
Fig. 6 Block diagram of data measurement system

보와 터빈 유량계로 계측되는 CNG 소모량을 아날로그 IO 포트로 입력받아 취급한다.

그림 6은 Labview로 작성된 모니터링 프로그램의 블록도를 나타낸다. 이 프로그램의 초기화면에서는 통신계측 또는 IO 계측 화면이 선택되도록 했으며, 프로그램 실행과 함께 데이터들이 자동 저장될 뿐만 아니라, 별도의 선택저장 기능도 추가하여 운전자가 원하는 시점에서 신속히 계측데이터를 기록할 수 있도록 했다. 그림 7은 계측프로그램이 설치된 계측컴퓨터 모니터 현시 화면으로, 초기화면은 MVB2CAN 변환기의 통신 계측상태와 추진시스템 구성품들의 life sign signal 및 동작상태 정보를 현시하고, 선택 저장기능을

그림 7 계측시스템 모니터링 프로그램 화면
Fig. 7 Monitoring display of data measurement equipment



(a) (b) (c) (d)

그림 8 CNG 소모량 측정용 가스터빈 유량계(a), 배터리팩 온도센서(b), 계측장비 모듈(c,d)
Fig. 8 Gas turbine flowmeter(a), thermocouple installed on battery module(b), measurement system module(c,d)

활성화시킬 수 있다. 하부메뉴는 각 구성품들에 대한 센서계측정보들을 숫자와 그래프형식으로 현시한다. 여기서 추진장치의 각 구성품별 전압, 전류, 전력, 온도 정보들을 그래픽화하고 동기화하여 구성품들의 동작 모니터링 및 이상동작을 신속히 확인할 수 있다.

그림8(a)는 CNG 소모량 측정을 위해 CNG 저압라인에 설치된 가스터빈 유량계를 보여준다. 터빈유량계와 함께 온도 및 압력센서를 설치해, 유량계 컴퓨터에서 가스의 압력과 온도변화에 따른 측정량을 보정하도록 했다.

추진시스템의 중요부분의 온도변화 추이 검출을 위해 엔진-발전기셋, 냉각 라디에이터, 추진인버터, 보조전원장치, 추진 배터리팩, 견인전동기 등에 열전대 온도센서를 부착했다. 그림 8(b)는 배터리 모듈에 장착된 열전대 센서를 보여준다. 이들 계측된 센서 신호들은 그림8(c,d)의 계측장비 모듈내의 Compact RIO로 입력되고 계측 프로그램 상에 실시간 파형으로 현시되어 온도 변화추이를 관찰할 수 있고 파일로 저장된다.

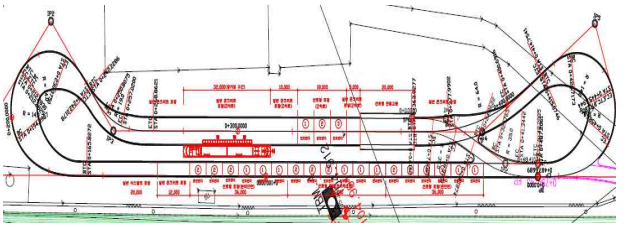


그림 9 시험선 평면도
Fig. 9 Floor plan of the test track

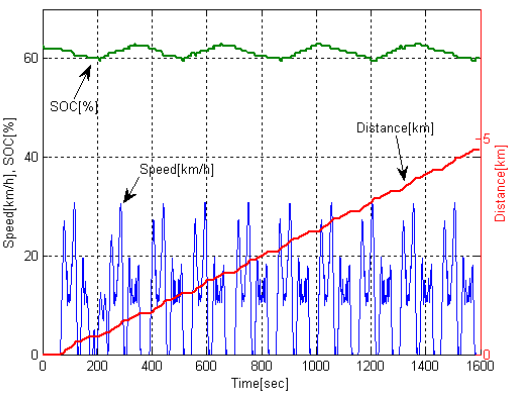


그림 10 시험선에서 자동운전 주행시 트램의 속도, 누적거리, 배터리팩의 SOC 값
Fig. 10 Speed, distance and battery SOC in automatic driving mode at test bed

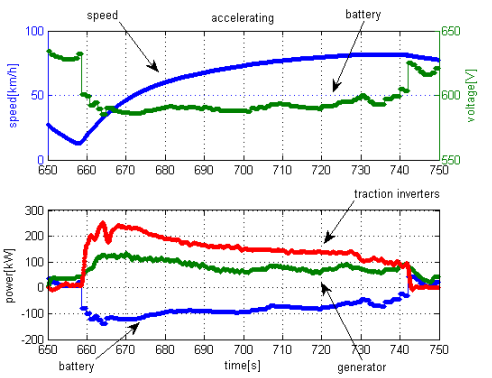
4. 측정결과

바이모달 트램은 전용시험선과 일반도로에서 주행시험을 실시했다. 바이모달 트램 전용 시험선은 경남 밀양 한국화이바 2공장 내에 위치하고 있으며, 운영센터와 정거장을 비롯한 각종 인프라 설비가 갖추어져 있다. 시험선의 주행노선 길이는 약 500m이고, 직선구간은 약 200m이며, 최고속도 50km/h까지 주행이 가능하다. 그림 9는 시험선의 평면도를 보여준다.

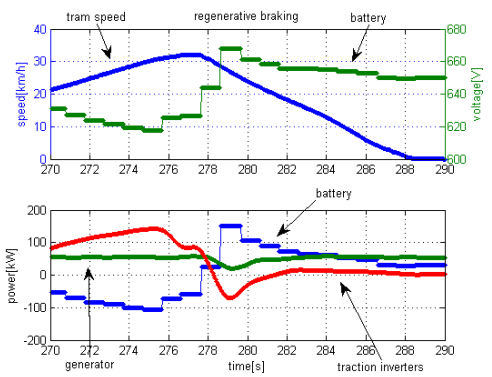
시험선에서 자동운전모드로 주행한 경우, 바이모달 트램의 속도, 주행누적거리, 배터리 SOC 파형을 그림 10에 나타낸다. 자동운전장치에 저장된 시험선의 자동운전 운행패턴에 따라 시험선 양측에서 2회 정차했고, 최고속도 31km/h, 표정속도 약 11km/h로 운행했다. 그림에서 보듯이 배터리의 SOC 값은 설정치인 59 ~ 63%를 유지하며 정상 주행한 것을 확인할 수 있다.

바이모달 트램의 최고속도 및 예비주행시험을 위해 일반도로 주행을 실시했다. 그림 11은 일반도로 주행노선을 위성사진 내에 표시한 것으로, 일반도로 주행로는 경남 밀양시 시험선 근방의 25번 국도와 1008번 지방도를 경유하며, 1회 약 50km의 주행거리를 갖는다.

그림 11 일반도로 주행노선
Fig. 11 Public road traced by bimodal tram



(a)



(b)

그림 12 최고속도 주행 계측데이터,
(a) 가속시, (b) 회생제동시
Fig. 12 Measurement data of maximum speed driving on public road,
(a) acceleration (b) regenerative braking.

그림 12(a)는 바이모달 트램이 최고속도 주행을 위해 가속시 차량속도, 추진인버터의 요구전력, 발전기 출력전력, 배터리팩 출력전력파형을 나타낸다. 차량속도는 80km/h까지 상승했으며, 가속시 요구되는 추진인버터의 요구전력은 엔진발전기 셋과 리튬폴리머 배터리팩에서 분배되어 공급되었다. 또한, 가속시 직류링크단 전압은 배터리 출력 전류와 내부 임피던스로 인해 전압강하가 발생했으며, 바이모달 트램의 추진인버터는 정상적으로 차량을 가속상태를 유지했다. 그림12(b)는 회생 제동시 배터리팩의 전압 및 전력, 추진인버터의 출력 파형을 보여준다. 회생제동시 견인전동기는 발전기로 동작해 추진인버터 입력단에 회생전력을 발생시켰고, 직류링크단 전압이 배터리 출력전압 보다 높아져 배터리팩을 충전시켰다.

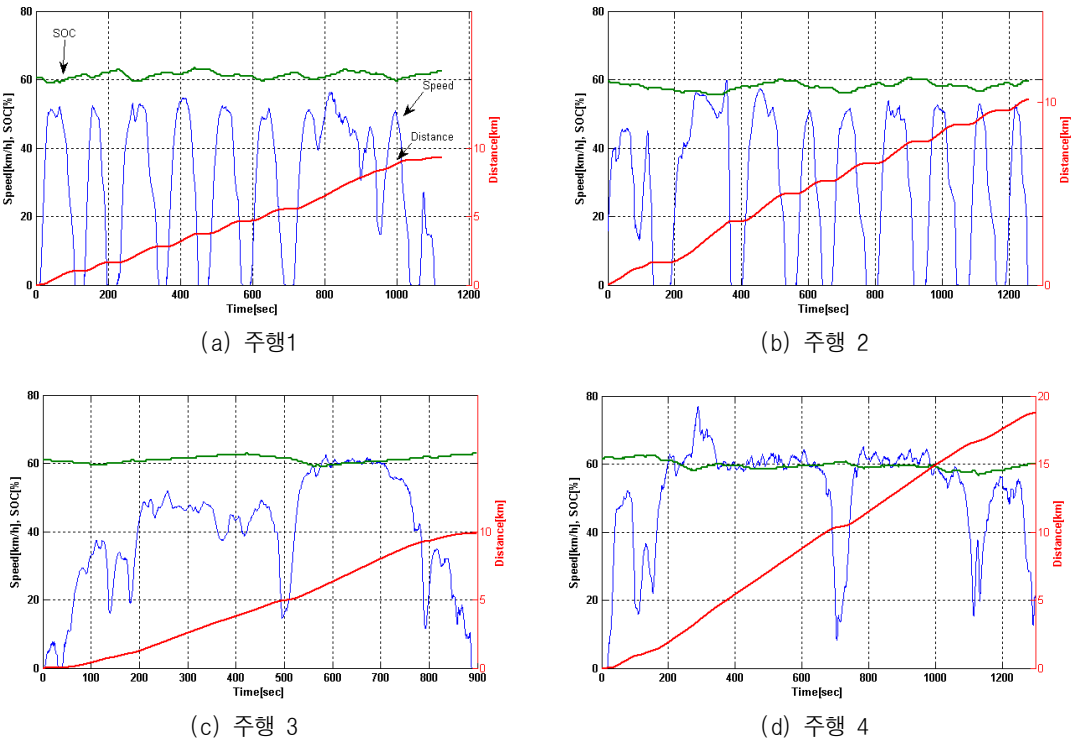
그림 13은 바이모달 트램이 일반도로 주행시 계측된 데이터이며, 트램 속도, 누적 주행거리, 배터리팩 SOC 파형들을 나타낸다. 주행조건에 따른 연비와 엔진 효율 계산을 위해 다양한 주행패턴으로 추진장치 데이터를 취득했다. 그림 13에 보여준 주행 1~4에 대해 바이모달 트램의 연료소비율을 계산했다. 일반적으로 직렬형 하이브리드 추진장치로 구동되는 차량에서 엔진-발전기 셋은 배터리팩과 함께 추진전력을 공급할 뿐만 아니라, 대용량 배터리팩을 충전시키고, SOC를 유지하는 역할도 수행한다. 따라서 연료소모량 계산 시에 주행 시작과 종료 시의 배터리 SOC 변화량이 연료 소모량 계산에 고려돼야 하고, ISO 23274에 따르면 연비계산을 위한 주행시험 시 식 (1)의 조건을 만족해야 한다[9].

$$|\Delta E_{RESS}| \leq 0.01 \times E_{CF} \tag{1}$$

여기서 ΔE_{RESS} 는 배터리 팩의 에너지 변화량이며, E_{CF}는 소비된 연료량을 에너지로 환산한 값이다. 연비 측정시, 시험환경과 차량 운전자의 운전 습관에 따라 식 (1)을 만족시키며 반복적으로 운행하기 어렵기 때문에, 식(2)와 같이 배터리 충전량의 변동을 보상한 EFC(Equivalent Fuel Consumption) 값으로 연비를 계산한다[10]. 여기서 k는 SOC correction factor값으로 식(3)로부터 얻어진다. 이 값은 배터리 팩에서의 에너지 소모량을 CNG 연료 소모량 값으로 환산한 값을 의미하며 바이모달 트램의 경우 표 3의 값을 적용했다.

$$EFC = FC - k \cdot \Delta SOC \tag{2}$$

$$k = \frac{Q}{\rho \cdot LHV \cdot \eta \cdot D} \tag{3}$$



(a) 주행1 (b) 주행 2

(c) 주행 3 (d) 주행 4

그림 13 일반도로 주행시 측정데이터
Fig. 13 Measurement data of driving on public road

표 3 SOC correction factor 계산을 위한 상수
Table 3 Parameters for SOC correction factor

parameters	values
lower heating value of CNG (LHV)	49.2 MJ/kg
fuel density of CNG (ρ)	0.7976 kg/m^3
battery capacity (Q)	50.4 kWh
overall charge efficiency (η)	0.25

여기서 ΔSOC는 주행 시작과 종료시점의 배터리 팩 SOC 변화량을 나타낸다. Q는 배터리팩의 에너지 용량, ρ는 CNG 연료 밀도, LHV는 lower heating value of CNG, D는 주행 거리, η는 엔진-발전기셋 또는 회생전력에 의한 배터리 충전효율이다.

표 4는 식(1)~(3)의 조건을 고려해 연료소비율을 계산 결과를 나타낸다. 바이모달 트램의 운행 패턴을 의미하는 표정속도에 따라, 연비 값이 변화됨을 알 수 있다. 잦은 주정차를 반복하는 주행 1과 비교해 정속운전 구간이 많은 주행 4의 경우 높은 연비를 갖게 된다.

아직까지 대형 버스 이상의 차량에 대해 공인 연비

표 4 SOC correction factor를 고려한 연비 계산
Table 4 Fuel consumption with consideration of SOC correction

항목	주행 1	주행 2	주행 3	주행 4
최고속도(km/h)	56.4	59.8	62.4	76.9
표정속도(km/h)	29.7	28.5	29.5	48.7
CNG 소모량(kg)	4.3	4.4	3.9	6.8
Correction factor(k)	1.65	1.51	1.55	0.81
EFC (km/m^3)	1.86	1.84	2.13	2.24

시험은 정속모드만으로 실시되고 있으며, 하이브리드 차량 시험을 위한 공인 시가지모드 연비시험 방식은 관련기관에서 개발 중이다. 향후, 바이모달 트램은 동일한 노선과 동일한 운행패턴으로 압축천연가스 차량을 운행시켜 연비 데이터를 비교하는 방식으로 시험할 필요가 있다.

표 5 일반도로 주행시 엔진효율 계산값
Table. 5 Efficiency of CNG engine on public road

항 목	주행 1	주행 2	주행 3	주행 4
Energy from genset (kWh)	17.4	17.7	15.5	28.6
Energy into traction inverters (kWh)	11.4	12.5	11.1	22.3
Energy from battery pack (ΔE_{RESS}, kWh)	1.72	0.4	1.1	1.1
Efficiency of CNG engine (η_f, %)	31.5	31.0	30.3	32.6

엔진에 공급된 CNG연료의 LHV와 연료소모량을 이용해 엔진에 입력되는 전력량을 산정하고, 엔진의 효율을 식(4)로 계산했다[11].

$$\eta_f(\%) = \frac{E_{fg}}{m_f \cdot LHV \cdot \eta_g} \times 100 \quad (4)$$

여기서 E_{fg}(kWh)는 발전기의 출력에너지, m_f(kg)는 CNG 연료 소비량을 의미한다. 또한, η_g는 발전기 효율 값으로 0.95로 설정했다. 표 5는 그림 13의 주행시 바이모달 트램 추진장치의 직류링크단 전력량 측정 값을 나타낸다. 엔진발전기의 출력 전력량과 식(4)으로부터 바이모달 트램의 CNG 엔진은 운행 패턴에 관계 없이 약 31%의 효율로 운전되고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진시스템과 성능시험 시 데이터 계측을 위해 개발된 계측장비에 대해 기술했고, 시험선과 일반도로에서 실시된 성능 측정 결과를 제시했다.

바이모달 트램을 시험선과 일반도로에서 주행하며 직렬형 하이브리드 추진장치의 성능 데이터를 취득했고, 계측된 데이터로부터 바이모달 트램의 성능을 분석했다. 표정속도를 변화에 따른, 직렬형 하이브리드 추진시스템의 연료소비율과 CNG 엔진의 효율 계산한 결과를 제시했다. 주행 시작과 종효 후에 배터리의 충력량에 따른 SOC 보상을 실시하여, 일반도로 주행시 연료소비율은 약 $1.8km/m^3$ 이상으로 얻어졌으며, 엔진은 약 31%의 효율로 운행됨을 확인했다.

앞으로, 바이모달 트램의 하이브리드 추진장치의 연비개선 효과 측정을 위한 비교 시험이 필요하며, 지속적으로 추진시스템의 성능을 최적화할 계획이다.

본 연구는 국토해양부와 건설교통기술평가원의 교통체계효율화사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 국토해양부, “신에너지 바이모달 저상굴절차량 개발”, 6차년도 연차보고서, 2009.

[2] Barsali S, Miulli C, Posseniti A, "A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehiles", *Energy conversion IEEE Trans. on*, Vol. 19, No.1, pp. 187-195, 2004.

[3] K. T. Chau and Y.S. Wong, "Overview of power management in hybrid electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, Issue 15, pp. 1953-1968, 2002.

[4] G. W. John, "Propulsion system for hybrid electric vehicles", *Electric Machine Design for All-Electric Hybrid-Electric vehicles*(Ref. No. 1996/196), IEE Colloquium on 1999.

[5] W. C. Donald, "High power battery systems for hybrid vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 105, No. 2, pp. 110-113, 2002, March.

[6] M. Ceraolo, P. Capozzella and F. Baronti, "CAN-LabView based Development Platform for fine-tuning Hybrid Vehicle Management Systems," *IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion*, pp. 433-438, 2005.

[7] IEC 61375-1, "Electric railway equipment-train bus", 2007.

[8] 배창한 외 3, "바이모달 트램의 추진장치 성능 모의," *한국철도학회 논문집*, 제12권, 제1호, pp. 122-128, 2009.

[9] ISO 23274, “Hybrid-electric road vehicles-exhaust emissions and fuel consumption measurements-non-externally chargeable vehicles", 2007

[10] W. W. Xiong and C.L. Yin, "Design of series-parallel hybrid electric propulsion systems and application in city transit bus", *WSEAS Transactions on systems*, Vol. 8, Issue 5, pp. 578-590, 2009.

[11] P. Bubna, D. Brunner, J.J. Gangloff, S.G. Advani, A. K. Prasad, "Analysis, operation and maintenance of a fuel cell/battery series-hybrid bus for urban transit applications", *Journal of Power Sources*, pp. 3939-3949, 2010.

저 자 소 개

배창한(裵昶漢)

1971년 8월 26일생. 1996년 아주대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전자공학과(공박). 2002년～현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

이강원(李剛遠)

1970년 2월 21일생. 1995년 충북대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과(공박). 2003년～현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

목재균(睦載均)

1962년 7월 12일생. 1986년 아주대 기계공학과 졸업. 1988년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 기계공학과(공박). 1995년～1997년 한국고속철도건설공단 선임연구원. 1997년～현재 한국철도기술연구원 책임연구원.

유두영(柳斗永)

1966년 8월 19일생. 1992년 숭실대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년～2000년 LG산전(주) 연구소 선임연구원. 2000년～현재 현대중공업(주) 기계전기연소 책임연구원.

배종민(裵宗珉)

1974년 11월 3일생. 2002년 동의대 전기공학과 졸업. 2008년～현재 (주)한국화이바 차량사업부 과장.